

# 基于子空间理论的人脸识别

JiYu ZiKongJian LiLun De  
RenLian ShiBie

白晓明 王成章/著



经济科学出版社  
Economic Science Press

# 基于子空间理论的 人脸识别

JiYu ZiKongJian LiLun De  
RenLian ShiBie

白晓明 王成章/著



经济科学出版社  
Economic Science Press

## 图书在版编目 (CIP) 数据

基于子空间理论的人脸识别 / 白晓明著.

—北京: 经济科学出版社, 2014. 12

ISBN 978 - 7 - 5141 - 5305 - 7

I. ①基… II. ①白… III. ①面 - 机器识别 - 研究

IV. ①TP391.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 292404 号

责任编辑: 王 丹

责任校对: 隗立娜

责任印制: 邱 天

## 基于子空间理论的人脸识别

白晓明 王成章 著

经济科学出版社出版、发行 新华书店经销

社址: 北京市海淀区阜成路甲 28 号 邮编: 100142

总编部电话: 010 - 88191217 发行部电话: 010 - 88191522

网址: [www. esp. com. cn](http://www.esp.com.cn)

电子邮件: [esp@ esp. com. cn](mailto:esp@esp.com.cn)

天猫网店: 经济科学出版社旗舰店

网址: [http: //jjkxcbs. tmall. com](http://jjkxcbs.tmall.com)

北京密兴印刷有限公司印装

710 × 1000 16 开 6.75 印张 150000 字

2014 年 12 月第 1 版 2014 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 978 - 7 - 5141 - 5305 - 7 定价: 28.00 元

(图书出现印装问题, 本社负责调换。电话: 010 - 88191502)

(版权所有 侵权必究 举报电话: 010 - 88191586)

电子邮箱: [dbts@ esp. com. cn](mailto:dbts@esp.com.cn))

## 序 言

随着图像处理、模式识别、机器学习、计算机视觉等研究领域的技术发展，以及商业、执法、公共安全等方面应用需求的广泛增加，作为生物特征识别技术之一的人脸识别研究受到了空前的重视。人脸识别是图像分析与理解、计算机视觉、计算机图形学和模式识别等领域最富有挑战性的课题之一。本书结合作者多年来相关的研究工作，对基于子空间理论的人脸识别方法进行了比较全面的介绍，希望能够对从事相关领域研究的人员起到帮助和启迪的作用。

本书从科研的角度出发，注重方法的理论性、系统性、实用性和前瞻性，不仅给出了基于子空间理论的人脸识别方法的原理，同时参考了国内外很多的研究文献，结合自己的科研工作，给出了各种方法的实验结果。在内容选取上，本书涵盖了以人脸灰度图像和人脸彩色图像为对象的人脸表示模型，不仅包含线性子空间理论下的人脸识别方法，还包括了非线性理

论下的人脸识别方法。算法中既有无先验知识的无监督的学习,也有融合先验知识的有监督的学习。人脸对象的特征提取主要以子空间理论为基础,研究人脸图像样本对象所张成的人脸空间上特征子空间的构建,包括线性子空间与非线性流形子空间,以及在相应特征子空间上的人脸对象的分类与识别。

本书正文一共包含4章,第1章系统全面的介绍人脸识别的研究现状,分析了各种现有方法的优势和不足,书中列出了150多篇有代表性的参考文献。第2章主要介绍线性子空间理论下,彩色人脸对象的表示和识别。包括彩色人脸图像的矩阵表示模型和块对角矩阵表示模型(用以编码彩色人脸图像的信息),基于彩色特征人脸的无监督特征子空间的构建方法,以及融合类别先验知识的有监督的基于Fisher块对角LNMF的特征子空间构建方法。第3章主要介绍非线性子空间理论下的人脸识别,包括基于线性测地线距离保持映射的降维算法和非线性测地线距离保持映射的降维算法。第4章一章对当前的研究工作进行了总结,并对今后的研究方向进行了展望。

本书的第2章由中央财经大学的王成章副教授负责撰写,其余章节由白晓明副教授撰写,全书的统稿由白晓明副教授完成。在本书的撰写过程中,首都经济贸易大学和中央财经大学的多位教师参与了一些问题的讨论并提出了宝贵的建议,特致以谢意。同时,我也对经济科学出版社编辑老师的严谨细致、精益求精的敬业精神深感敬佩,在此一并表示感谢。

本书旨在对基于子空间理论的人脸识别研究给出系统介绍,推进相关学科建设与理论研究的发展。由于水平和条件有限,书中错误与不足之处在所难免,真诚地希望广大读者批评指正。

# 目 录

## 第1章 绪论 / 1

### 1.1 研究背景及意义 / 1

### 1.2 研究现状 / 3

#### 1.2.1 基于特征的方法 / 3

#### 1.2.2 基于模板的方法 / 8

#### 1.2.3 基于模型的方法 / 10

#### 1.2.4 基于机器学习的方法 / 15

#### 1.2.5 基于子空间的方法 / 18

## 第2章 基于线性子空间的人脸识别 / 29

### 2.1 基于彩色特征人脸的人脸识别 / 29

#### 2.1.1 彩色人脸图像的表示 / 30

#### 2.1.2 彩色特征人脸的计算 / 32

#### 2.1.3 特征提取及分类识别 / 34

#### 2.1.4 实验结果 / 35

#### 2.1.5 小结 / 40

2.2 基于 Fisher 块对角 LNMF 的彩色人脸识别 / 41

2.2.1 NMF 算法 / 42

2.2.2 彩色人脸图像的块对角表示模型 / 43

2.2.3 Fisher-BDLNMF 算法 / 43

2.2.4 实验结果 / 46

2.2.5 小结 / 49

第3章 基于非线性子空间的人脸识别 / 50

3.1 基于线性测地线距离保持映射的人脸识别 / 50

3.1.1 基于线性测地线距离保持映射的降维算法 / 51

3.1.2 特征提取及分类识别 / 55

3.2 基于非线性测地线距离保持映射的人脸识别 / 55

3.2.1 基于非线性测地线距离保持映射的降维算法 / 56

3.2.2 特征提取及分类识别 / 63

3.3 实验结果 / 64

3.3.1 ORL 人脸数据库实验结果 / 64

3.3.2 Yale 人脸数据库实验结果 / 68

3.3.3 CMU-PIE 人脸数据库实验结果 / 71

3.3.4 YaleB Extended 人脸数据库实验结果 / 74

3.4 小结 / 79

第4章 结论与展望 / 81

4.1 研究总结 / 81

4.2 进一步的研究和展望 / 82

参考文献 / 83

# 第 1 章

## 绪 论

---

人脸识别是人类视觉系统所具有的最基本和最重要的功能之一，也是人类交流的基础。人们通过这一视觉功能识别彼此的身份，理解对方的情感和意图。因此，利用计算机进行人脸自动识别（Automatic Face Recognition, AFR）一直是模式识别、计算机视觉、计算机图形学等领域中的重要研究课题。

### 1.1 研究背景及意义

人脸识别技术是人脸图像分析与理解中研究得最早、成果最为丰富的一项技术<sup>[1]</sup>，有着广泛的应用前景。人脸识别的主要应用领域包括：（1）身份验证。利用人脸识别技术可以确认护照、信用卡、身份证等证件的真伪；可以鉴别某人是否为合法进入者。（2）罪



犯识别。根据实拍照片和罪犯档案库的对比可以确认罪犯身份。(3) 场景监视。在机场、车站等人流量大的场所搜索或跟踪特定的人物。(4) 无接触人机交互<sup>[2]</sup>。利用人脸特征点和成像几何计算凝视点的位置,用视点的移动控制光标。(5) 可视通信<sup>[3]</sup>。用特征描述人脸,得到大比例压缩图像,从而降低数码率,实现低速信道上的实时可视通信。

除了具有重要的应用价值,人脸识别研究在学术上也有着重要的意义。人脸是典型的形变体,特征分布具有对称性。对这种形变体的深入研究有助于解决一般三维物体的识别问题,从而能够推动计算机视觉和模式识别等领域中基础研究的发展。人脸识别作为一种典型的图像分析与理解、模式分类计算问题,为模式识别、图像处理、计算机视觉、人工智能、人机交互、计算机图形学、认知科学、生理学、心理学等学科提供了一个良好的具体问题,有利于构建这些学科领域的基础实验平台,用于尝试新方法、验证新理论、解释新现象。人脸识别问题的深入研究和最终解决,将可极大促进相关学科的研究和发展。同时,人脸识别也是智能人机接口领域的重要研究内容之一。人脸识别本质上是要赋予计算机区分不同人物个体的能力,这也恰恰是智能人机接口研究需要解决的问题之一,是机器智能的重要表现。人脸识别问题的最终解决将可改善目前呆板、不方便的人机交互环境,从而在一定程度上改变人们的生活方式。

人脸识别又是一个非常具有挑战性的课题,主要研究内容包括人脸区域检测;人脸特征检测;头部姿态估计;自动人脸识别;面部表情分析与合成;性别和种族识别。由于人脸是非刚性的物体,具有复杂的三维结构,高准确率的人脸识别是非常困难的,其原因主要在于:(1) 人脸是由复杂的三维曲面构成的可变形体,很难用精确的数学模型描述。人脸是具有可塑性极强的三维柔性皮肤的表面,会随

着表情、年龄等的变化而发生改变。(2) 所有人物的脸部结构都高度相似,但人脸的图像又会受到各种成像条件的影响,其中包括光照、视角、人脸姿态、年龄老化、表情等,这使得同一个人在不同条件下的图像差别可能比不同的人在相同条件下的图像差别还要大。人脸识别技术所需解决的重要问题就是研究能承受上述变化条件,并能在复杂背景下可靠工作的人脸识别算法,这些都给人脸识别研究带来了巨大的困难和挑战。

## 1.2 研究现状

最早的关于人脸识别的研究可以追溯到 20 世纪末,弗朗西斯·高尔顿 (Francis Galton) 分别于 1888 年和 1910 年在《自然》(Nature) 杂志上发表了两篇关于利用人脸进行身份识别的文章,对人类自身的人脸识别能力进行了分析,但当时还未涉及人脸的自动识别问题。陈 (Chan) 等<sup>[4]</sup>于 1965 年在 Panoramic Research Inc. 发表的技术报告是最早的自动人脸识别的研究论文。人脸识别研究的方法主要包括以下几点:

### 1.2.1 基于特征的方法

基于特征的人脸识别<sup>[5,6,7]</sup>是通过提取人脸图像的代表特征来进行识别的。一类基于特征的方法是在抽取人脸几何特征的基础上完成的。人脸的几何特征包括各个面部器官的形状、灰度以及各个器官之间的结构关系(如位置、距离和角度等),这些特征利用了人脸的先验结构知识,比较简单和直观,是最容易想到的人脸特征。

高尔顿<sup>[5]</sup>最早利用手工的方式在人脸的侧面轮廓上提取了一组基准点,然后从这组基准点求得一组可用于识别的特征度量,如距离、角度和面积等进行人脸识别。哈蒙(Harmon)等<sup>[6]</sup>在此基础上提出了一种自动的人脸侧面轮廓识别方法,并讨论了这些基准点特征的有效性。

布莱索(Bledsoe)<sup>[7]</sup>用手工的方法确定人脸特征点的位置并将其输入到计算机中,在给定待识别人脸的特征点距离后,用最近邻方法或其他分类方法来识别人脸。布鲁内利(Brunelli)<sup>[8]</sup>的人脸识别方法可以看作是几何特征提取方面的经典工作,该方法利用人脸边缘图的积分投影提取人脸的35个几何特征,其结果如图1-1(a)所示。其中既有反映器官形状的特征,如嘴巴中心到下巴边缘的11条半径。也有反映位置关系的特征,如眼睛的位置、鼻子的宽度和长度、嘴巴的位置等。他还提出了利用灰度模板来表示人脸几何特征的方法,如图1-1(b)所示。

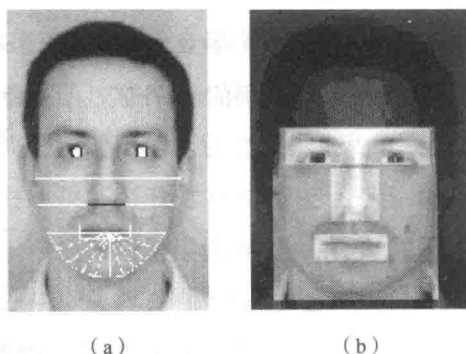


图1-1 正面人脸的几何特征

凯利(Kelly)<sup>[9]</sup>在布莱索(Bledso)工作的基础上进行了研究,利用头部的宽度、眼睛之间的距离、头顶到眼睛的距离、眼睛到鼻子

的距离、眼睛到嘴巴的距离作为几何特征,采用最近邻分类法进行人脸识别。后来很多学者对这一方法进行了发展,包括卡拉(Kara)和小林(Kobayashi)<sup>[10]</sup>,克劳(Craw)等<sup>[11]</sup>,波焦(Poggio)等<sup>[12]</sup>,布鲁内利(Brunelli)等<sup>[13]</sup>,贾(Jia)等<sup>[14]</sup>等研究工作。尼古拉斯·罗德(Nicholas Roeder)和李晓波(Xiaobo Li)<sup>[15]</sup>对基于几何特征的人脸识别方法的准确性进行了研究。他们对人脸的眼睛、嘴巴、面颊和下巴等定义了12个测量量,通过试验研究这些测量量对识别准确率的影响,研究发现人脸识别的准确性依赖于人脸特征定位的准确性。

基于几何特征的方法虽然比较直观,但在人脸识别应用中的效果却不是很理想。因为人脸能够产生塑性变形,即使几何特征提取得再准确也会产生较大的误差,而且姿势的变化也会对几何特征的有效性造成影响。

另一类基于特征的方法是在抽取人脸图像代数特征的基础上完成的。基于代数特征的方法把一幅人脸图像看作是以像素点灰度值为元素的矩阵,把反映矩阵某些性质的数值特征当作人脸的特征。这些特征反映了图像的整体性质,但是没有直接的认知意义。

洪(Hong)<sup>[16]</sup>提出了一种利用奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)来获取人脸特征的方式,作为一种代数特征进行人脸识别。奇异值具有代数和几何的不变性,并且对噪声不敏感。该方法利用人脸图像的奇异值作为特征,采用基于最优鉴别平面的贝叶斯(Bayes)决策来进行人脸识别。此后,程(Cheng)等<sup>[17]</sup>发展了洪(Hong)的识别方法,他们利用秩分解的方法进行降维处理,以提取人脸图像的奇异值。还在SVD的基础上提出了表示人脸的特征图像和投影图像的概念,并导出了基于投影图像的人脸特征提取方法。佩内夫(Penev)和艾提克(Atick)<sup>[18]</sup>提出了一种基于局部特征

分析 (Local Feature Analysis, LFA) 的人脸识别方法。该方法首先利用主成分分析的方法建立了一组局部相关的特征矢量, 然后利用稀疏 (Sparsification) 技术来选择得到一组相关性最少, 且附加有拓扑索引的特征集, 通过选择一组核 (Kernel) 函数来表征人脸的局部特征。LFA 方法通过对基矢量加上一个拓扑索引来描述图像的局部特征和拓扑特征。

人脸图像的纹理分布也是一种非常重要的特征。通常人脸上的重要的特征点都具有很强的纹理特性, 比如边缘的端点或者具有较大曲率变化的地方。人类视觉皮层细胞中超复杂 (Hypercomplex) 细胞具有一种顶端抑制的性质, 对这些特征点特别敏感。拉德斯 (Lades) 等<sup>[19]</sup>利用 Gabor 小波变换来模拟超复杂视觉细胞的这种性质, 提出了一种动态链接结构 (Dynamic Link Architecture, DLA) 来描述这些特征, 其中结点代表各特征点, 特征点包含不同频率的 Gabor 小波变换的输出。结点之间的连线代表特征点之间的关系, 比如特征点之间的距离。最后通过弹性图匹配 (Elastic Graph Matching, EGM) 的方法来完成识别。如图 1-2 所示。通常一张人脸中的特征点数目为 30~40。后来, 维斯考特 (Wiskott) 等<sup>[20,21]</sup>在 EGM 方法的基础上, 进一步提出了弹性束图匹配 (Elastic Bunch Graph Matching, EBGM) 方法用于人脸识别。该方法对原来的 EGM 算法做了改进, 将 Gabor 小波变换系数的相位用于格点的定位, 提高了定位精度; 应用目标自适应图, 使得图的格点对应人脸的一些关键特征点; 通过将少数几幅图像的 Jet 进行合并, 形成 Jet 束, 由此提出了描述人脸特征的弹性束图这种新的数据结构, 大大降低了人脸匹配的时间。尔茨 (Wurtz)<sup>[22]</sup>也提取了相似的图像特征, 通过多模板匹配的方法进行人脸识别。

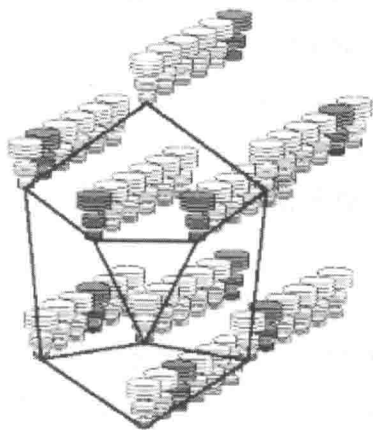


图 1-2 弹性图匹配特征表示结构

基于弹性图匹配和弹性束图匹配的人脸识别算法选取了人脸网格点的 Gabor 特征来描述人脸,较好地表示了人脸的局部纹理信息。该方法在匹配过程中允许匹配点有一定的位置偏移,使得对于人脸的表情变化和姿态变化具有一定的鲁棒性。但是,如何选取人脸网格点已获得最佳的识别性能,还有待于进一步研究。该方法还存在计算量大,识别速度慢的问题。

拉玛苏布若曼尼 (Ramasubramanian) 等<sup>[23]</sup>提出了利用 DCT 变换提取人脸的纹理特征,然后通过 PCA 和人类视觉系统 (HVS) 对人脸图像进行编码和识别的方法。这种方法的优点是在识别的同时实现了对人脸图像的压缩。萨苏哈 (Shashua) 等<sup>[24]</sup>于 2001 年提出了一种基于商图像的人脸识别与绘制技术。这种方法假设同一视点的人脸图像属于同一类物体,同一类物体的不同个体上的点是一一对应的,具有相同的法向,所以可以根据已有的图像和新图像得到他们之间的比例图像,比例图像具有光照不变性。这种方法直接用比例图像进行识别,也可以利用比例图像获得不同光照条件下的人脸图像。同时,

该方法利用同一视点下 3 幅独立光照条件的图像恢复光照图像空间, 它的优点是克服光照对人脸识别的影响, 缺点是对图像对齐的要求很高, 容易受到表情和饰物的影响。

### 1.2.2 基于模板的方法

基于模板匹配的人脸识别<sup>[23,24,25]</sup>方法是一种经典的模式识别方法, 这种方法常常利用人脸图像的灰度值进行相关运算, 直接计算两幅图像之间的匹配程度。由于这种方法要求两幅图像上的目标要有相同的尺度、取向和光照条件, 所以预处理要对人脸图像做尺度归一化和灰度归一化的工作。

最简单的模板匹配方法是每个人作为数据库中的一个条目, 它的字段包含一个从其正面人脸像抽取的二维点阵, 图像必须经过归一化处理。识别时, 未分类的图像跟数据库中的所有图像数据进行比较, 采用相关性作为典型的匹配函数。一般意义上讲, 基于模板匹配的方法是一个更理性的途径, 问题的关键是如何描述模板。当对图像进行相似性分析时, 系统应能够容忍模板和实际图像之间的差别, 而这种容忍度往往趋向于抹杀人脸之间的差别, 给人脸识别带来一定的困难。

欧萨姆 (Osamu) 等<sup>[26]</sup>提出了等灰度图模板匹配的方法。所谓等灰度图就是对原始图像进行二值化处理后得到的图像。该方法首先利用 Sobel 算子抽取人脸图像的轮廓边缘, 在消除噪声后, 利用粗化和细化的方法将轮廓边缘存在的不连续点进行连接, 将人脸从背景中抽出。然后将不同尺寸大小的图像进行归一化处理, 利用灰度直方图来抽取等灰度线图。灰度直方图被分成 8 部分, 形成 8 张等灰度线图, 最后将这 8 幅等灰度线图叠加, 形成最终的等灰度线图。最后,

用合成的等灰度线图匹配识别,也可以用各个灰度线图进行匹配,对各个匹配赋予一定的权值,最后综合起来进行判别。哈里南 (Hallinan)<sup>[27]</sup> 在研究中利用模板匹配的方法检测眼睛。将模板描述为具有均匀灰度值的两个区域:一个区域是虹膜部分,另一个区域是眼睛的白色部分。并据此构造了眼睛原型,利用不同的分布表示它的变化,定义了一个价格函数并采用最速下降法寻找极小值。

伯奇菲尔德 (Birchfield)<sup>[28]</sup> 在研究中将整个人脸看成一个椭圆模板,由此进行不同视点的人脸识别工作。另一种方法是将人脸用一组互相独立的小模板表示,如眼睛模板、嘴巴模板、鼻子模板以及眉毛、下巴模板等。尤尔 (Yuille) 等<sup>[29]</sup> 提出了采用可变形模板来进行人脸识别的方法。可变形模板的基本思想是设计一个参数可调的器官模型,如图 1-3 所示。然后利用器官图像的灰度和梯度信息定义一个模型的能量函数。通过模型和图像的不断相互交互,调整参数使能量函数极小化,极小化后的模型参数就成为器官的表示特征。在尤尔 (Yuille) 等人研究方法的基础上,不断又有人提出了改进的可变形模板方法<sup>[30,31]</sup>。这种方法的缺点是计算量大,模型的参数需要经验确定,并且能量函数的收敛性受到函数初值的影响比较大。

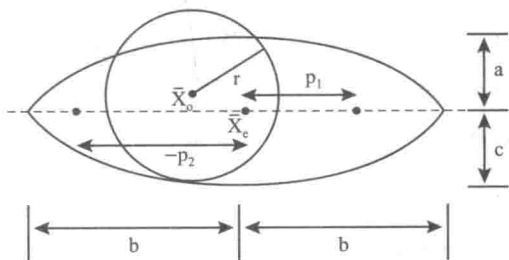


图 1-3 眼睛的可变形模板

布鲁内利 (Brunelli) 等<sup>[32]</sup> 专门比较了基于几何特征的人脸识别



方法和基于模板匹配的人脸识别方法,并得出结论:基于几何特征的人脸识别方法具有识别速度快和内存要求小的优点,但在识别率上模板匹配要优于基于几何特征的识别方法。增加几何特征对于基于几何特征的人脸识别方法的识别率提高不大,因为要提高几何特征的提取质量本身就十分困难,而且随着图像质量的下降和人脸遮挡的引入,基于几何特征的人脸识别效果会大幅下降。总之,他们认为模板匹配法要优于几何特征法。但是,模板的起始位置对于确定人脸特征的准确位置至关重要。例如,当模板从眉毛上开始时,算法就很难区分眼睛和眉毛。这种算法的另一个缺点是计算复杂度高。

### 1.2.3 基于模型的方法

基于模型的人脸识别方法是通过若干张不同姿态、不同表情、受不同光照条件等影响的人脸照片来建立能够描述人脸内在特征的数学模型,用模型参数来表示一个对象的脸像,人脸库中存储的只是模型参数。

典型的模型包括:主动轮廓模型(Active Contour Model, ACM)<sup>[33]</sup>,主动形状模型(Active Shape Model, ASM)<sup>[34]</sup>,主动外观模型(Active Appearance Model, AAM)<sup>[35]</sup>,体频率模型(Volumetric Frequency Representation, VFR)<sup>[36]</sup>,隐马尔科夫(Markov)模型(Hidden Markov Model, HMM)<sup>[37]</sup>,三维可变形模型(3D Morphable Model)<sup>[38]</sup>等。

主动轮廓模型(Active Contour Model, ACM)算法又叫作蛇行算法<sup>[33]</sup>,它也是现在比较常用的一种人脸器官几何特征提取方法。黄(Huang)等<sup>[38]</sup>利用这种方法完成了头部轮廓、眉毛和鼻孔的检测。拉姆(Lam)提出了一种快速贪心算法来提取人脸的轮廓。库茨